

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-354721
 (43)Date of publication of application : 06.12.2002

(51)Int.Cl.

H02K 1/27
 H02K 15/03
 H02K 21/16

(21)Application number : 2001-160676

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 29.05.2001

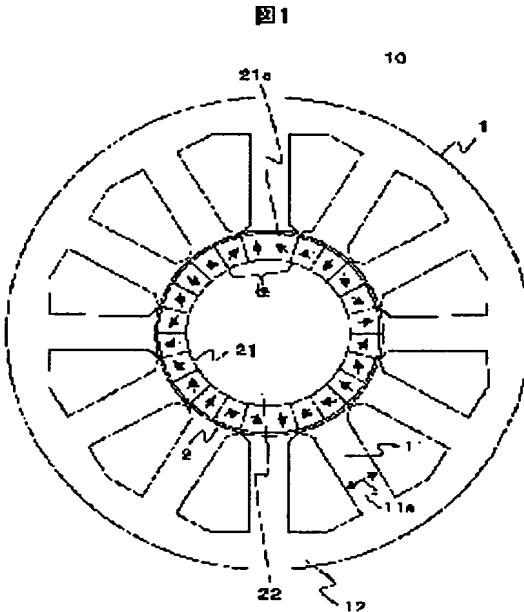
(72)Inventor : KANEDA JUNYA
 KITAMURA MASAJI
 KOMURO MATAHIRO
 TOMEOKU HIROSHI
 ITO MOTOYA

(54) ROTATING ELECTRIC MACHINE COMPRISING PERMANENT MAGNET ROTOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To miniaturize and improve the efficiency of a permanent magnet rotating electric machine, with reduced cogging torque.

SOLUTION: A permanent magnet rotor 2 is provided where p -pieces of permanent magnet blocks 21 (p is the number of magnetic poles of rotor, n is an integer of 2 or more) are arranged in the circumferential direction on the circumferential surface or near it facing the stator 1. The permanent magnet block 21 meets the followings (a) to (e): (a) $(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = (A_i \cdot p/2)$, (b) A_i is the angle between the radial center lines of i -th permanent magnet block and $i+1$ -th permanent magnet block in clockwise rotation assumed to be positive (c) θ_i is the angle between the magnetizing direction of i -th permanent magnet block and outward radial direction, and (d) θ_{i+1} is the angle between the magnetizing direction of $i+1$ -th permanent magnet block and outward radial direction, while the stator 1 comprises m -pieces of salient magnetic poles arrayed with constant separation, and meets the following (f): (f) $m/p \leq 1.5$.



[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-354721

(P2002-354721A)

(43)公開日 平成14年12月6日 (2002.12.6)

(51)Int.Cl.⁷

H 02 K 1/27

識別記号

5 0 1

F I

H 02 K 1/27

テ-マコ-ト⁸ (参考)

5 0 1 A 5 H 6 2 1

5 0 1 K 5 H 6 2 2

5 0 1 M

15/03

21/16

15/03

21/16

G

M

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 14 頁)

(21)出願番号

特願2001-160676(P2001-160676)

(22)出願日

平成13年5月29日 (2001.5.29)

(71)出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

金田 潤也

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株

式会社日立製作所日立研究所内

北村 正司

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株

式会社日立製作所日立研究所内

(74)代理人 100084032

弁理士 三品 岩男

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 永久磁石式回転子を備えた回転電機

(57)【要約】

【課題】 永久磁石式回転電機の小型・高効率化し、コギングトルクを低減する。

【解決手段】 固定子1に面した円周面上または円周面近傍に、円周方向に $p \cdot n$ 個 (p は回転子磁極数、 n は2以上の整数) の永久磁石ブロック21が配置された永久磁石式回転子2とを備えている。各永久磁石ブロック21は、それぞれ、以下の(a)から(e)を満たす。

(a) $(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = (A_i \cdot p/2)$

(b) 時計回りを正としたとき、 i 番目の永久磁石ブロックと $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの径方向中心線間の角度を A_i

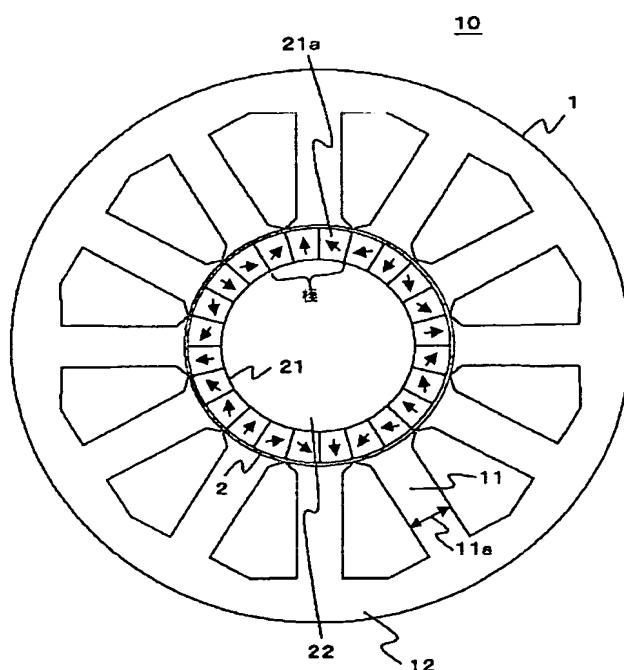
(c) i 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_i

(d) $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_{i+1}

固定子1は、等間隔に配置された m 個の突極磁極を有し、以下の(f)を満たす。

(f) $m/p \leq 1.5$

図1



【特許請求の範囲】

【請求項1】 固定子と永久磁石式回転子とを備える回転電機において、

前記固定子に面した前記回転子の円周面上または円周面近傍に、円周方向に $p \cdot n$ 個（ p は回転子磁極数、 n は2以上の整数）の永久磁石ブロックが配置されていて、各永久磁石ブロックは、それぞれ、以下の条件を満たす回転電機。

$$(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = \pm (A_i \cdot p/2)$$

ここで、時計回りを正としたとき、 i 番目の永久磁石ブロックと $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの径方向中心線間の角度を A_i 、 i 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_i 、 $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_{i+1} 、および、 \pm は、+が内転型回転電機の場合、-が外転型回転電機の場合。

【請求項2】 請求項1に記載の回転電機において、前記固定子は、等間隔に配置された m 個の突極磁極を有し、以下の条件を満たす回転電機。

$$m/p \leq 1.5$$

【請求項3】 請求項1または2に記載の回転電機において、

前記回転子の外径を r 、各永久磁石ブロックの厚さを t としたとき、以下の条件を満たす回転電機。

$$t/r \geq 0.15$$

【請求項4】 請求項1から3のいずれかに記載の回転電機において、

前記回転子は、円周表面または円周表面近傍に永久磁石ブロックを拘束するための拘束部を備えることを特徴とする回転電機。

【請求項5】 請求項4記載の回転電機において、前記拘束部は、円周表面上に設けられた溝であることを特徴とする回転電機。

【請求項6】 請求項4記載の回転電機において、前記拘束部は、円周表面近傍に設けられた孔であることを特徴とする回転電機。

【請求項7】 請求項1から6のいずれかに記載の回転電機において、

前記永久磁石ブロックは、NdFeB焼結磁石であることを特徴とする回転電機。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、回転子に永久磁石を具備する永久磁石式回転電機に係り、特に回転子表面に磁石を配した表面磁石式回転電機に関する。また、同一の構成に従ったリニアモータ、アキシャルギャップ回転電機にも関する。

【0002】

【従来の技術】回転電機は、構造や機構、制御形態等により様々な種類に分類され、回転子に永久磁石を用いた

永久磁石式回転電機も製造されている。そのうちでも、回転子表面に永久磁石を配した表面磁石式回転電機は小型・高効率の回転電機である。

【0003】K. Halbachにより提案された磁化ベクトル分布を表面磁石式回転子の円筒状磁石に適用した場合、ギャップ磁束密度を大きくかつ磁束密度分布が正弦波となる理想的な回転子を構成できることがK. AtallahとD. Howeにより明らかにされている（IEEE Transactions on Magnetics, pp. 2060-2062, vol. 34, No. 4, 1998）。以下、この理想的な磁化ベクトル分布をもつ円筒状磁石を理想Halbach磁石と呼ぶ。理想Halbach磁石は、その磁化ベクトルの分布状態から実質的に製造不可能である。そこで、より理想Halbach磁石に近い磁化ベクトル分布を有す円筒状磁石が望まれる。

【0004】その一つが、理想Halbach磁石の磁界を再現するような分布を持つ磁界で着磁された極異方Halbach磁石である。これは、K. AtallahとD. HoweによりIEEE Transactions on Magnetics, pp. 2060-2062, vol. 34, No. 4, 1998やPatent Application No. PCT/GB97/00895に明示されているように、表面磁束密度分布は正弦波に近く、また逆誘起電圧波形も正弦波状であり、さらには回転電機のトルクを増加させることができる。

【0005】しかし、理想Halbach磁石に比べ着磁量が不十分である部分や着磁方向がずれている部分がある。特に、着磁が不十分である部分は、電機子の磁界により減磁する恐れが有り、回転電機性能の安定性の上では好ましくない。

【0006】また、極異方Halbach磁石は円筒状磁石そのものを理想Halbach磁石の磁化ベクトル分布に近い状態に配向させたり、着磁させたりしなければならず、配向や着磁に必要な磁界が非常に大きなものとなる。したがって、ある程度小型の円筒状磁石でなければ製造することが難しく、大型化は困難である。

【0007】もう一つの方法として、E. PotenzianiらによるJournal Applied Physics, pp. 5986-5987, Vol. 64, No. 10, 1988やM. MarinescuとN. MarinescuによるIEEE Transactions on Magnetics, pp. 1390-1393, vol. 28, No. 2, 1992に明示されているように、円筒状磁石の1極を複数の磁石ブロックに分割し、各ブロックの着磁方向を連続的に回転させることで、断続的な磁化ベクトル分布を有す分割Halbach磁石がある。この磁石の表面磁束密度分布はラジアル配向磁石に比べ正弦波に近いものの高調波成分を含んでいる。ただし、磁石ブロック毎に配向や着磁が可能であるため、着磁が不十分な部分をなくし減磁の可能性を低く抑えることができる。特に、M. MarinescuとN. Marinescuの解析によると、1極当たり3あるいは4分割することにより、6極18スロットの回転電機の発生トルクを大きくでき、コギングトルクを低減することができるとの結果が得られている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】回転電機の特性を改善するためには、上記のように回転子の特性を良好にしなければならない。しかし、回転子と固定子の組み合わせにより回転電機の特性が決定されるので、回転子と固定子それぞれの特性が優れ、かつその組み合わせが好適である必要がある。

【0009】そこで、本発明は、永久磁石式回転電機の小型・高効率化、およびコギングトルク低減を目的とする。

【0010】

【課題を解決するための手段】前記目的を達成するため、本発明の一態様によれば、固定子と永久磁石式回転子とを備える回転電機において、前記固定子に面した前記回転子の円周面上または円周面近傍に、円周方向に $p \cdot n$ 個 (p は回転子磁極数、 n は 2 以上の整数) の永久磁石ブロックが配置されていて、各永久磁石ブロックは、それぞれ、以下の (a) から (e) を満たす。

【0011】

$$(a) (\theta_i) - (\theta_{i+1}) = \pm (A_i \cdot p / 2)$$

(b) 時計回りを正としたとき、 i 番目の永久磁石ブロックと $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの径方向中心線間の角度を A_i

(c) i 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_i

(d) $i+1$ 番目の永久磁石ブロックの着磁方向と外向き径方向とのなす角を θ_{i+1}

(e) \pm において、 $+$ は内転型回転電機の場合、 $-$ は外転型回転電機の場合

【0012】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態について、図面を用いて説明する。

【0013】図 1 に本発明の第 1 の実施形態に係る内転型永久磁石式回転電機 10 の回転軸方向に垂直な断面の構成を示す。この回転電機 10 は、固定子 1 と回転子 2 とを有する。

【0014】固定子 1 は、突極極数が 12、つまりスロット数が 12 であり、集中巻方式の巻線（図示しない）が施されている。固定子 1 は、ティース 11 とコアパック 12 とが、それぞれ電磁鋼板を積層して作られ、ティース 11 に集中巻方式の巻線を施した後、コアパック 12 に挿入して形成されている。回転子 2 は、固定子 1 内側に回転軸を中心としてベアリングに支持されて回転するよう設置されている（いずれも図示しない）。ベアリングはエンドブラケット（図示しない）で支持され、固定子 1 を取り囲むハウジング（図示しない）とエンドブラケットを固定することにより回転電機 10 が構成されている。

【0015】回転子 2 は、回転子シャフト 22 と、その周囲に配置された磁石ブロック 21（符号は 1 箇所のみ付す）とを備える。回転子シャフト 22 は、強磁性体、

たとえば、鉄製のものを用いると好適である。しかし、回転子シャフト 22 は、必ずしも強磁性体でなくてもよい。すなわち、本実施形態のような内転型の場合、磁石内側への磁束の漏れが小さいので、ヨークとしての役割を持つ鉄心である必要はなく、非磁性材でもわずかに表面磁束密度が小さくなるだけで強度保持の役割を担うことができるからである。

【0016】磁石ブロック 21 は、永久磁石であり、着磁方向は矢印 21a で示す一方向である。磁石ブロック 21 の形状の例を図 2 に示す。図 2 には、円筒状磁石を径方向に沿って切断した磁石ブロック 21 の断面形状を示す。図 2 (a) は弓形、(b) は台形、(c) は多角形、(d) は長方形である。磁石ブロック 21 は、(a) の弓型の磁石ブロックを式 (1) の着磁方向の条件に従い配置したものが最も好ましい。しかし、上記の弓形以外でも着磁方向分布が後述する式 (1) を満足すれば、図 2 の (b) ~ (d) のように台形、多角形、長方形などでもよい。また、各磁石ブロックは、均等分割でなくても着磁方向の分布が式 (1) の条件を満たすものであればよい。

【0017】本実施形態に係る回転子 2 は、3 つの磁石ブロック 21 で、1 つの極を構成する。すなわち、図 1 に示す回転子 2 は、8 極表面磁石式回転子である。磁石ブロック 21 は、回転子シャフト 22 に直接貼り付けられている。磁石ブロック 21 同士、および磁石ブロック 21 と回転子シャフト 22 とは、エポキシ系の接着剤で接着し、固定されている。磁石表面の磁束密度を大きくするためには、接着剤層が薄い方が良いが、接着強度を確保するためにはそれに見合う接着剤層を設ける必要がある。したがって、回転子の形状または大きさ、磁石の形状または大きさ、材質等により要求される接着強度に応じた接着剤層を設けなければならない。

【0018】磁石ブロック 21 に用いる磁石は、フェライト系のボンド磁石、焼結磁石、NdFeB系のボンド磁石、焼結磁石、Sm-Co系の焼結磁石、SmFeN系のボンド磁石のいずれでもよい。ただし、一つの磁石ブロック 21 は矢印 21a で示す方向へ平行着磁されていることから、磁石性能や着磁性能を考慮した場合、配向されている磁石、すなわち各種焼結磁石および異方性ボンド磁石を用いる方が好ましい。特に、本実施形態のような分割 Halbach 磁石では、反磁界により減磁することが懸念されることから保持力の大きな磁石が好ましく、NdFeB 焼結磁石が最も好ましい。また、隣接する磁石ブロック同士は必ずしも密着している必要はなく、スペーサを挟んでもよい。このスペーサは非磁性でも強磁性でもよいが、磁石の残留磁束密度より大きな飽和磁束密度をもつ強磁性体が好ましい。

【0019】なお、各磁石ブロック 21 の磁化ベクトルは、VSM（試料振動型磁力計）を用いて測定して、定めた。すなわち、磁石ブロックと同形状の Ni 試料を用い

て、形状による校正係数を求めた後、VSMの磁界方向と磁石の取り付け方向を変化させながら磁石ブロックの磁化を測定する。測定した磁化が最大となる方向が、着磁方向となる。また、測定した磁化量を体積で除した値が着磁量となる。

【0020】以下の説明のために行った実験で用いた磁石ブロックは、Ni試料での測定の結果、形状による校正は必要なかった。また、全磁石ブロックの着磁方向は設計の方向に対し±2度の範囲に入っていた。さらに、着磁量のばらつきは±3%以内であった。磁石ブロックの着磁状態は、理想磁化ベクトルと実際の磁化ベクトルとの差（磁化ベクトル誤差）の絶対値が、理想磁化ベクトルの絶対値の20%以下であれば許容することができる。

【0021】本実施形態に係る分割Halbach磁石は、それぞれの磁石ブロックを十分に着磁すれば設計通りの特性を得ることができる。しかし、この方法によると着磁した磁石を円環状に配置しなければならない。このため、より簡易な製造方法として、未着磁の磁石ブロックを配置した後、着磁する方法がある。あるいは、複数の未着磁の磁石ブロックを接着した後、着磁してもよい。これらの場合、着磁方向によっては十分に着磁できないこともあるが、上記誤差範囲内であれば所定の性能を発揮できる。

【0022】次に、磁石ブロック21の着磁方向21aについて、図3を用いて説明する。図3(a)および(b)は、回転子磁極数をpとし、各極をn個の磁石ブロックで構成した場合の磁石ブロック21の配置を示す。ここでは、時計回りを正としたときにi番目の磁石ブロック21とi+1番目の磁石ブロック21の径方向中心線間の角度をAiとし、外向き径方向と前記永久磁石ブロックの着磁方向21aのなす角をそれぞれθi、θi+1とすると、以下の関係を満たす。

【0023】

$$(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = (A_i \cdot p / 2) \dots (1)$$

磁石ブロックの着磁方向は、隣り合う磁石ブロック間で式(1)が成立する限り、どの方向を基準として定めてもよい。このことは、例えば図3(b)のようにラジアル方向を着磁方向に持つ磁石ブロックを基準としても、図4のようにラジアル方向から10°傾いた方向に着磁された磁石ブロックを基準としても同等の特性を得ることができることを意味する。

【0024】さらに、円筒状磁石を軸方向に垂直な面で複数部に分割しそれぞれを適当なスキュー角だけずらすことによりコギングトルクを低減することができる。

【0025】固定子1の1本のティース11には、集中巻線以外にティース11内を流れる磁束を測定するためのサーチコイル（図示しない）が巻かれている。回転子2を回転させたときにサーチコイルに生じる誘起電圧からティース11の最大磁束密度を求めた。その結果を図

5に示す。

【0026】ここで用いた回転子2の磁極数pは、いずれも8極であり、一極当たりの分割数は1、2および4である。分割数1はラジアル着磁ではなく、ラジアル方向の平行着磁磁石を用いた。また、固定子の突極極数mは6、9、12、24である。したがって、固定子の突極極数pと回転子極数mとの比m/pはそれぞれ0.75、1.125、1.5および3.0である。固定子コアには飽和磁束密度が1.9Tの素材を用いた。

【0027】図5よりm/pが増加するに従いティースの最大磁束密度は増加し、コア材の飽和磁束密度に近づく。1極当たり1分割（分割なし）、つまりラジアル着磁の場合、m/p値が大きくなても飽和磁束密度には達しないが、2分割以上の場合m/p値が1.5のときほぼ飽和磁束密度に達し、それ以上のm/pでは飽和のため磁束密度に大きな増加は見られない。この図より明らかなように、本発明の回転子の円筒状表面磁石を一極当たり複数に分割した分割Halbach磁石にすることにより、回転子の表面磁束密度の高い位置にある固定子ティースでは磁束密度が高くなり、条件によっては磁束密度が飽和する。この傾向は分割数およびm/p値が増加するに従い顕著となる。したがって、分割Halbach磁石回転子では、m/p値が、1.5以下が好ましい。

【0028】次に、一極あたりの分割数に応じた、回転子の表面磁束密度分布の違いを測定するため、図7に示す分割数の異なる6極表面磁石式回転子を用いて磁束密度を測定した。すなわち、図7の(a)～(f)には、一極当たり1～6個の磁石ブロック21（各図とも1箇所のみ符号を付す）で構成した回転子2を示す。矢印21a（各図とも1箇所のみ符号を付す）は各磁石ブロック21の配向および着磁方向を示す。ここで、磁石はNdFeB系焼結磁石を用いた。また、磁石ブロック21のラジアル方向の厚みtと、回転子2の外径（磁石ブロックの厚みを含む）rとの肉厚の比t/rを0.4とした。この表面磁石式回転子の表面磁束密度分布を、アクティブ領域直径が1mmのホール素子を用いて測定した。その結果を図8に示す。ここでは、1極対分に相当する120°分を表示している。

【0029】これから明らかなように、1分割（分割なし）では、磁束密度は矩形波状の分布であるが、分割数が増えるとより正弦波に近い波形となっている。

【0030】したがって、回転子2の表面磁束密度が強い部分に位置する固定子のティース11は、磁気飽和しやすい状況になる。ティース11が磁気飽和すると、コギングトルクが発生する。このとき、ティース11の開幅を広くして、磁束密度の強度を抑えることにより、コギングトルクを抑制できる。しかし、固定子のスロットには巻線が存在し、巻線に印加される電流によってもトルクが決定されるので、ティースを広くしスロットを狭く設計しただけでは必要とされる巻線が施せず、所定の

回転電機特性を得ることはできない。

【0031】そこで、発明者らは、1極当りのティース本数を少なく限定してティース幅11を広げることが、分割Halbach磁石式回転子に好適な固定子構成であることを見出した。これは、すなわち、式(2)に示す条件を満たすように回転子一極あたりの固定子突極数を定めることである。

【0032】式(2)の条件であれば、上記のように巻線を集中巻にすることができる。集中巻は突極磁極数とコイル数が同等であり、分布巻に比べ巻線が簡便である。また、ティースとコアパックを分割した分割コアとすることで、ティースに集中巻線を施したのち組み立てることが出来、巻線の占積率を上げ固定子の磁気装荷を高くすることができるので、回転電機の小型化を図ることができる。この場合、 m/p は0.75以上1.5以下の値を取る。上記条件をはずれる分布巻では、スロット開口部幅を広くしなければならず、またスロット数が多いため全集に占めるスロット開口部幅が広くなる。それに伴いコギングトルクが大きくなってしまう。したがって、 m/p は0.75以上1.5以下がさらに好ましい。

【0033】図1に示す回転電機10では、 $m=12$ 、 $p=8$ であるから、式(2)の関係を満たす。この条件を満たす表面磁石式回転子では、同一の特性を持つ磁石素材により構成された場合、ラジアル着磁磁石を用いた回転子に比べ表面磁束密度分布が、後述するように、正弦波形状に近くなる。さらに、表面磁束密度分布の基本波成分がラジアル着磁より大きな値を示す。

【0034】また、図8の磁束密度分布波形から波形解析を行った結果を図9に示す。図9は、分割数に応じた表面磁束密度分布に含まれる高調波成分の強度を示す。これより、1次の基本波成分は、分割数が増加するに従い増加することがわかる。したがって、分割数が増えるにつれてより大きなトルクを発生できるものと考えられる。また、分割数が増えるにつれ、高調波成分が高次に移動し、さらに高調波成分全体としては減少することがわかる。この結果、分割数の増加はコギングトルクの低減にも寄与すると考えられる。

【0035】理想Halbach磁石は、磁石を厚くするに従い最大表面磁束密度が増加することが知られている。しかしながら、分割Halbach磁石では明らかではない。そこで、回転子に10極分割Halbach磁石を設置し、その表面磁束密度分布をホール素子で測定し、その分布の波形解析により基本波成分を算出した。用いた分割Halbach磁石の分割数は1、2および4である。1分割はラジアル方向の平行着磁である。

【0036】その結果得られた表面磁束密度の基本波成分と t/r の関係を図10に示す。これから明らかなように、1分割では t/r を大きくしても0.15を境に飽和している。分割数が2以上では t/r が大きくなる

に従い表面磁束密度の基本波成分が大きくなる。 t/r が1.5以上では分割数が2以上で1分割磁石の値を上回る。

【0037】上記 t/r は0.15以下であっても本発明の磁化ベクトル分布を有していれば表面磁束密度分布が正弦波状になり、回転電機特性の上ではその長所を享受できる。ただし、磁石厚さが上記条件(t/r が0.15以上)を満たす範囲であれば、ラジアル着磁磁石に比べ表面磁束密度の基本波成分を大きくすることができ、トルクを増加させることができる。また、磁石厚さが薄い場合には、電機子が形成する磁界により減磁を生じる恐れがある。以上の理由により、回転子の固定子近接径 r に対する永久磁石厚さ t の比 t/r は0.15以上が好ましい。さらには0.2以上が好ましい。

【0038】一極当りの分割数が2以上であれば磁石を厚くするに従い表面磁束密度の基本波成分を大きくでき、大きなトルクを生み出すことができる。3分割以上であればこの効果がさらに大きくなり、かつ表面磁束密度分布が正弦波に近づき高調波成分が高次となるため、回転電機の特性にとっては好適である。さらに、4分割以上ではコギングトルクを低減することが期待でき、より好ましい。但し、コギングトルクは分割数を増やせば単調に減少するものではなく、 m/p 値に対し適当な分割数であればコギングトルクを非常に小さくすることができる。本発明の回転子においても、表面磁石にスキーを施すことはコギングトルクを低減する上で有効である。この場合、磁石ブロックを軸方向に分割し、所定の角度だけずらすことによるスキーであれば容易に実施できる。

【0039】次に、8極6スロット、8極9スロット、8極12スロット、10極12スロットの4種類の回転電機について、回転子表面の磁石の分割数を一極当り1から6まで変えた場合のコギングトルクを比較した。それぞれのコギングトルクは1分割(分割なし)を1としたときの相対値で示した。ここで1分割はラジアル方向の平行着磁である。その結果を図11に示す。

【0040】この図より明らかのように、2分割以上では1分割に比べコギングトルクを低く抑えることができた。また、回転子の磁極数と固定子の突極磁極数の組み合わせによりコギングトルクをさらに小さくできる分割数が存在することも明らかとなった。本実施例によれば、8極6スロットおよび8極12スロットでは、3分割までに比べ4分割以上でよりコギングトルクが小さくなり、その中では4分割が最も小さかった。8極9スロットでは5分割以上でコギングトルクが非常に小さくなつた。10極12スロットでは他の組み合わせに比べ2分割で小さなコギングトルクとなつたが、5分割では比較的大きなコギングトルクを示した。ただし、4分割では非常に小さなコギングトルクとなつた。

【0041】以上から明らかのように、2分割以上では

ラジアル着磁に比ベコギングトルクを小さく抑えることができる。ただし、コギングトルクは分割数を増加させることで単調に減少する訳ではなく、それぞれの極数とスロット数の組合せにおいてコギングトルクを極小化するためには適正な分割数が存在する。

【0042】磁石ブロックに着磁誤差がある場合には、コギングトルクが大きくなる可能性がある。そこで、10極12スロットの回転電機で、1極当たり3分割にした磁石ブロックのうち、着磁方向が径方向に設定されている磁石ブロックのうち1つの磁石ブロックの着磁方向を変化させ、コギングトルクを評価した。この磁石ブロック以外のブロックは、実施形態1と同程度の精度で着磁されていた。ここで、(設計の磁化ベクトルと測定した磁化ベクトルの差の絶対値) / (設計の磁化ベクトルの絶対値) × 100を着磁誤差(%)と定義した。磁化ベクトルの測定は第1の実施形態と同様にVSMを用いて行った。その結果を図12に示す。

【0043】これより、着磁誤差が増加するに従いコギングトルクが大きくなることがわかる。特に、着磁誤差が30%ではコギングトルクも非常に大きく増加する。すべての磁石ブロックに同程度の着磁誤差がある場合、全体でのコギングトルクは係数 \sqrt{N} (Nは磁石ブロック数)を乗した値になると予測される。ここでは、10極3分割であるので磁石ブロックは30個、係数は $\sqrt{30} \approx 5.5$ となる。磁石ブロックすべてに同程度の着磁誤差が存在すると仮定した場合、コギングトルクの増加割合を1.0程度に抑えるためには、図12で示される磁石ブロック1つの着磁誤差によるコギングトルクの増加割合は $1.0 \div 5.5 \approx 0.2$ 程度が望まれる。したがって、着磁誤差は20%以下であることが好ましい。

【0044】次に、回転電機10で用いることができる回転子2に関する他の実施形態を示す。回転子2が高速で回転する場合、回転子シャフト表面に並んだ磁石ブロックに遠心力が働くので、円筒状に構成された磁石の外周には、金属製の薄肉円筒管をかぶせるか、あるいは補強用テープを捲回することが好ましい。そこで、本発明に係る回転電機に図13に示す回転子2を用いると好適である。

【0045】図13には、磁石ブロック21を接着剤5で回転子シャフト22表面に接着し、外側に金属製の薄肉円筒管4を被せた回転子2の回転軸と垂直な断面図を示す。金属製の薄肉円筒管4は強磁性でも非磁性でもよい。強磁性材円筒管の場合、回転子表面の磁束密度はそれほど小さくならず、かつ、高調波成分を低減できる。これにより、発生トルクを小さくすることなくコギングトルクを低減することができる。しかし、鉄損を発生することとなる。一方、非磁性円筒管の場合、実質的にはギャップと同等の扱いとなる。但し、渦電流損は発生する。

【0046】次に、回転電機10で用いることができる

回転子2に関するさらに異なる実施形態を示す。図14から図19に回転子2の回転軸方向に垂直な断面図を示す。図14に示す回転子シャフト22の周囲に配置された磁石拘束部材25は、8極の回転子を形成するためのもので、磁石ブロックを収容し、拘束するための溝25aを備える。図14(a)に示す例では、3つの磁石ブロックを収納できる溝25aを8つ備える。図14(b)に示す例では、1つの磁石ブロックを収納できる溝25aを24個備える。これらの磁石拘束部材25に、それぞれ磁石ブロック21を収納したときの状態を図15に示す。

【0047】図15に示すように構成することで、磁石ブロック同士の反発力による飛散を抑制できる。特に、図14(a)に示す構成では、1つの溝25a内の3つの磁石はそれぞれ引き合い、安定する。

【0048】また、図17に示す磁石拘束部材25も、8極の回転子を形成するためのものである。ここで示す磁石拘束部材25は、磁石ブロックを収容し、拘束するための孔25bを備える。図17(a)に示す例では、3つの磁石ブロックを収納できる孔25bを8つ備える。図17(b)に示す例では、1つの磁石ブロックを収納できる孔25bを24個備える。これらの磁石拘束部材25に、それぞれ磁石ブロック21を収納したときの状態を図17に示す。

【0049】図17に示すように構成することで、図15に示す例よりもさらに磁石ブロック同士の反発力による飛散を抑制できる。特に、図17(a)に示す構成では、1つの孔25b内の3つの磁石はそれぞれ引き合い、安定する。

【0050】また、図18(a)は、図14(a)に示す磁石拘束部材25に、磁石ブロック21を収容した他の態様であり、図18(b)は、図14(b)に示す磁石拘束部材25に、磁石ブロック21を収容した他の態様である。

【0051】図19は、図14または図17に示す磁石拘束部材25の変形例である。すなわち、(a)に示す磁石拘束部材25は、2つの磁気ブロックを収容するための溝25aと一つの磁気ブロックを収容するための溝25aとが交互に配置されている。(b)に示す磁石拘束部材25は、2つの磁気ブロックを収容するための孔25bと一つの磁気ブロックを収容するための孔25bとが交互に配置されている。これにより、1つの溝25aまたは孔25bに収容される磁石ブロック21は、それぞれ引き合うため、安定する。

【0052】次に、第2の実施形態について示す。本実施形態では、図1の回転子2と同一の形状で、磁石ブロック21をフェライト系焼結磁石で構成した。各磁石ブロック21の形状、配向および着磁方向は、いずれも第1の実施形態と同じである。本実施形態に係る回転子を用いて、第1の実施形態と同様に磁束密度を測定した。

その結果を図6に示す。

【0053】これによれば、フェライト系焼結磁石では、測定した範囲内では固定子ティースに磁気飽和は生じないことがわかる。さらに、この図より明らかのように、分割数1では m/p 値が大きくなつてもティース最大磁束密度の増加幅は小さい。一方、分割数が2以上では m/p 値の増加に従いティース最大磁束密度も増加する。この場合、フェライト系焼結磁石は残留磁束密度が小さいために、ティースが磁気飽和に達しなかつた。しかし、回転子の更なる小型化を図るとティース磁束密度が増加し磁気飽和に達する可能性も出てくる。特に、 m/p 値が1.5を超えると1分割と2分割以上との差が大きくなると考えられる。したがつて、ティース最大磁

$$(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = - (A_i \cdot p/2) \dots (1')$$

【0056】

【発明の効果】本発明によれば、永久磁石式回転電機の小型・高効率化、およびコギングトルク低減を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を適用した内転型永久磁石式回転電機10の回転軸に垂直な方向の断面図である。

【図2】磁石ブロック21の断面形状の例を示す図である。

【図3】磁石ブロック21の着磁方向21aを説明するための図である。

【図4】磁石ブロック21の着磁方向21aを説明するための図である。

【図5】8極表面磁石式回転電機の固定子の突極極数pと回転子極数mとの比 m/p と、ティースの最大磁束密度との関係を示すグラフである。

【図6】8極表面磁石式回転電機の固定子の突極極数pと回転子極数mとの比 m/p と、ティースの最大磁束密度との関係を示すグラフである。

【図7】一極あたりの分割数が異なる6極表面磁石式回転子の回転軸に垂直な方向の断面図である。

【図8】一極あたりの分割数が異なる6極表面磁石式回転子の表面磁束密度分布を示す図である。

【図9】一極あたりの分割数が異なる6極表面磁石式回転子の表面磁束密度分布の高調波成分の分布を示す図である。

【図10】一極あたりの分割数が異なる10極表面磁石

束密度は小さい方がよく、 m/p 値も小さい方が好ましい。本実施形態の場合も m/p 値が1.5以下であれば好適である。

【0054】なお、上記の説明においては内転型の回転電機、または、それに用いる回転子について説明した。しかし、本発明は外転型の回転電機にも適用可能である。外転型の回転子2の回転軸との垂直断面の構造を図20に示す。回転子2は、回転子リング23の内側に磁石ブロック21を接着剤等で接着して構成することができる。外転型回転子の場合、式(1)は次式で表される。

【0055】

$$(\theta_i) - (\theta_{i+1}) = - (A_i \cdot p/2) \dots (1')$$

式回転子の磁石の厚みtと回転子外径rとの比と、表面磁束密度基本波成分との関係を示すグラフである。

【図11】一極あたりの分割数が異なる回転電機のコギングトルク相対値を示すグラフである。

【図12】着磁誤差とコギングトルクの増加割合を示すグラフである。

【図13】金属製の薄肉円筒管4を被せた回転子2の回転軸と垂直方向の断面図である。

【図14】磁石拘束部材25の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

【図15】回転子2の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

【図16】磁石拘束部材25の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

【図17】回転子2の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

【図18】回転子2の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

【図19】回転子2の回転軸と垂直方向の断面形状の例を示す図である。

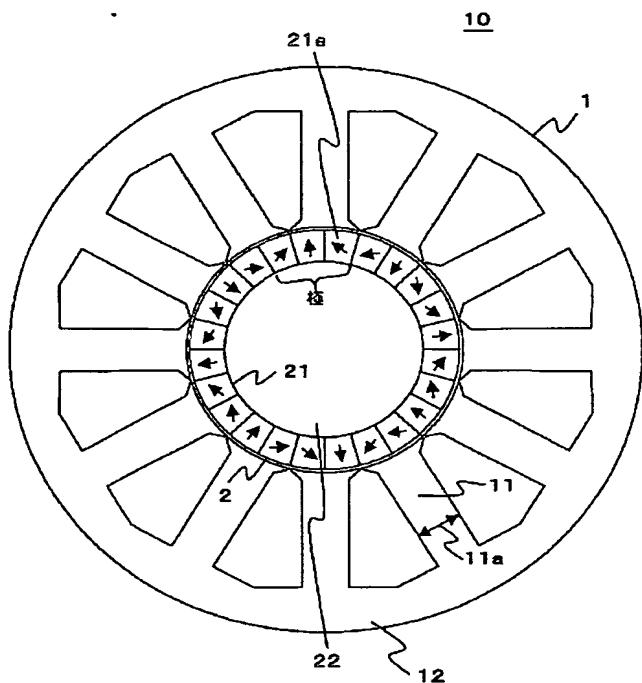
【図20】本発明を適用した外転型永久磁石式回転電機10の回転軸に垂直な方向の断面図である。

【符号の説明】

1…固定子、2…回転子、10…回転電機、11…ティース、12…コアパック、21…磁石ブロック、22…回転子シャフト。

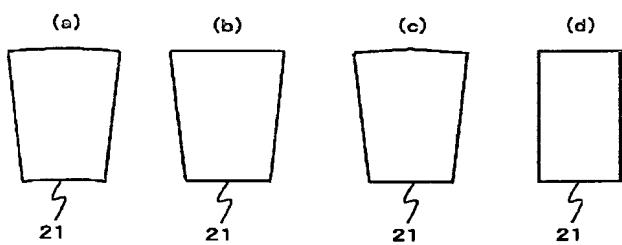
【図1】

図1



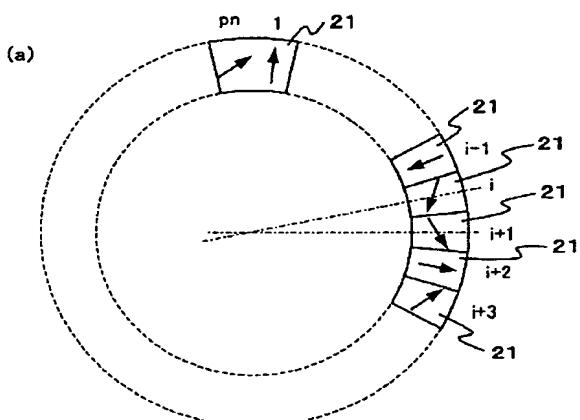
【図2】

図2



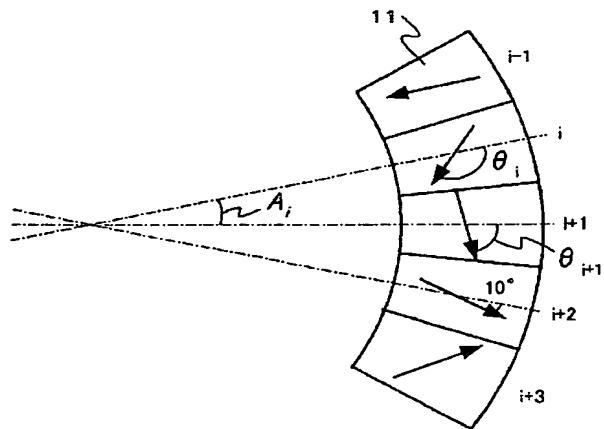
【図3】

図3

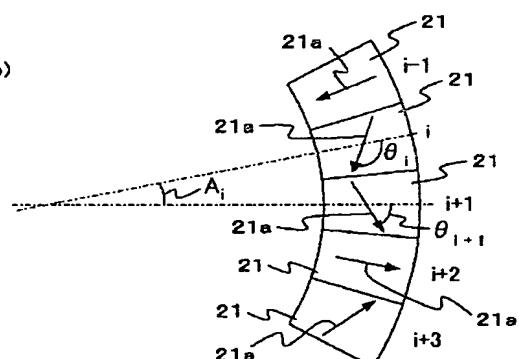


【図4】

図4

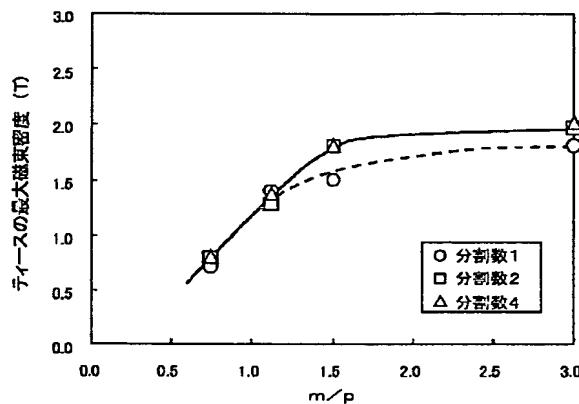


(b)



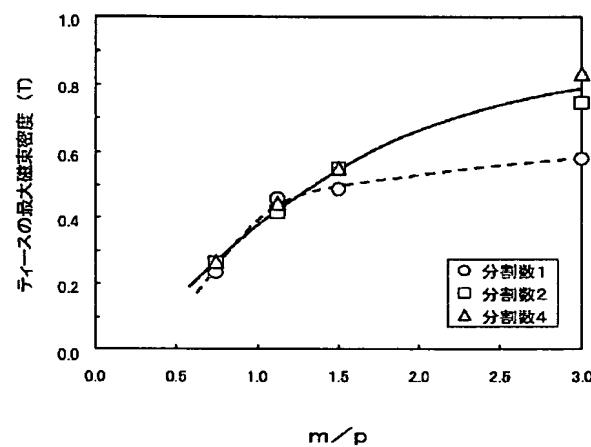
【図5】

図5



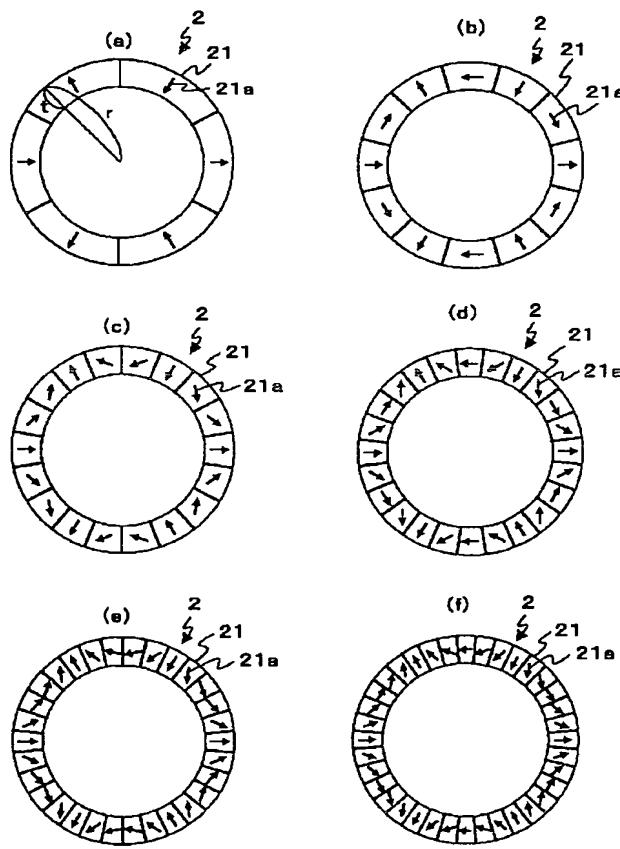
【図6】

図6



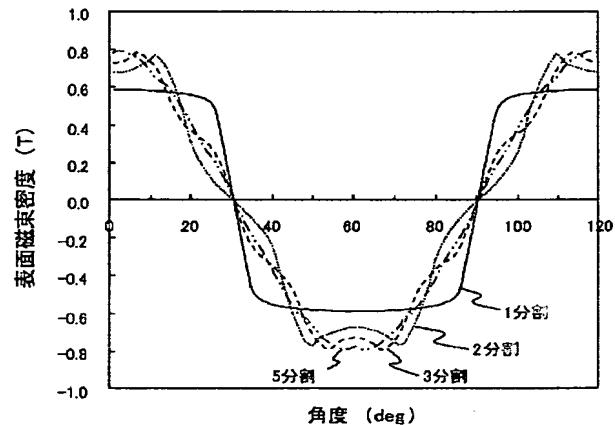
【図7】

図7



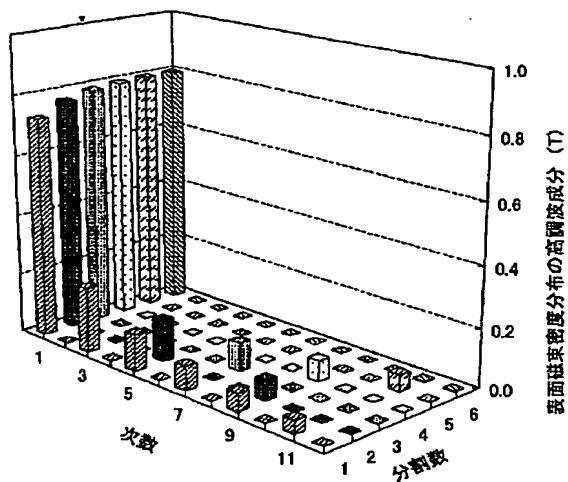
【図8】

図8



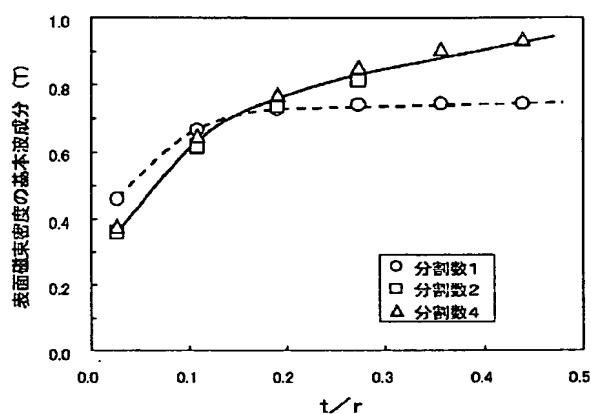
【図9】

図9



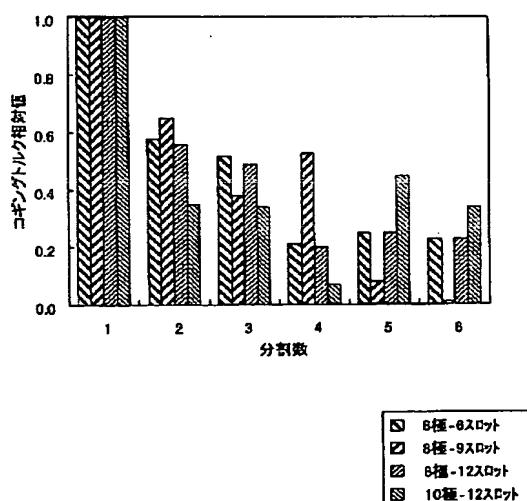
【図10】

図10



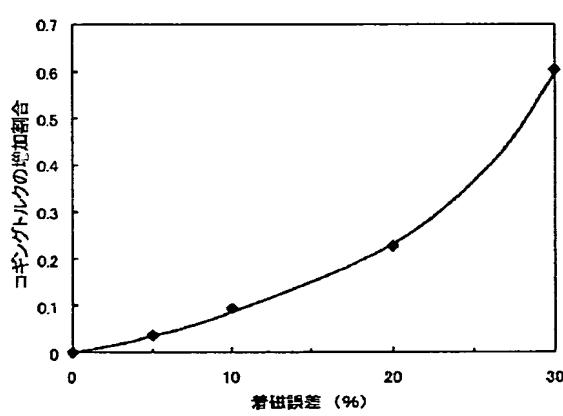
【図11】

図11



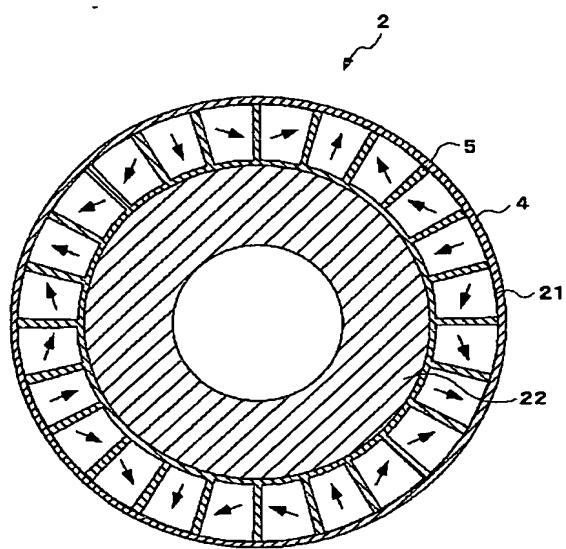
【図12】

図12



【図13】

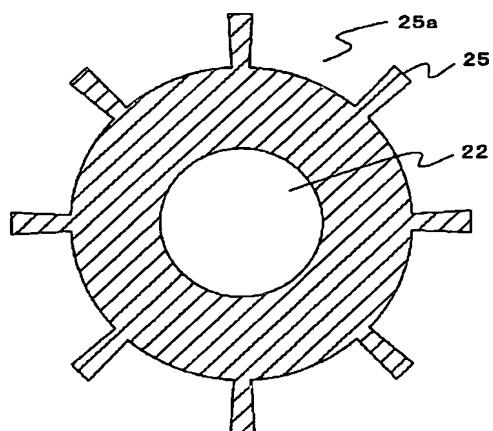
図13



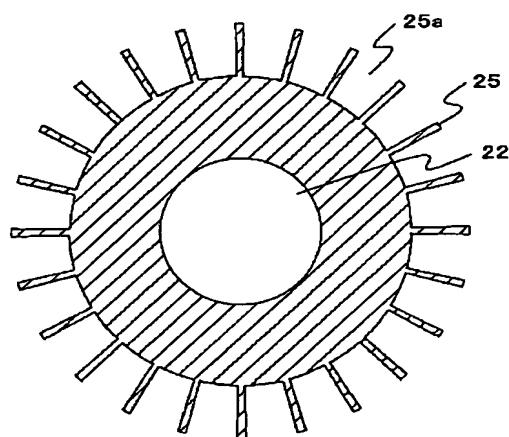
【図14】

図14

(a)

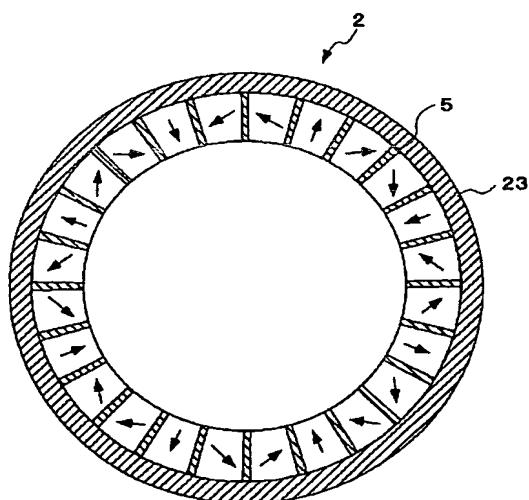


(b)



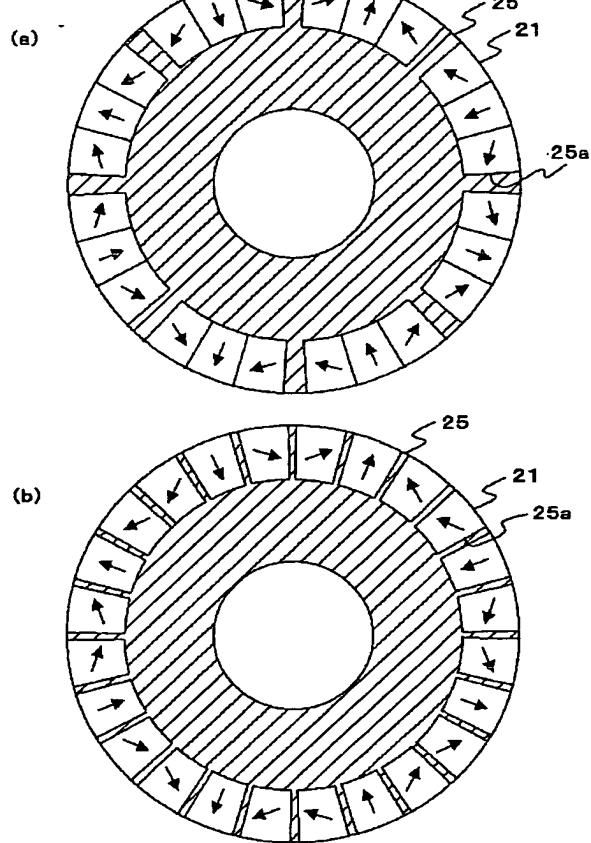
【図20】

図20



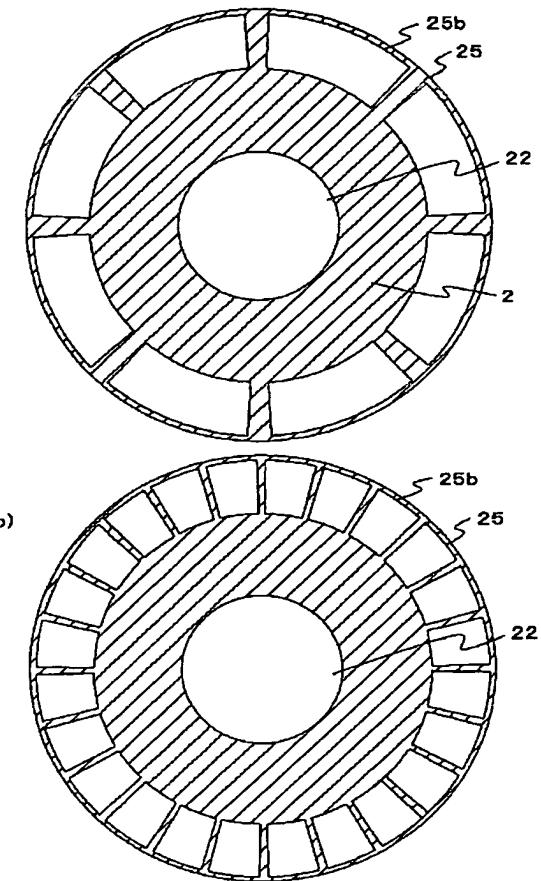
【図15】

図15



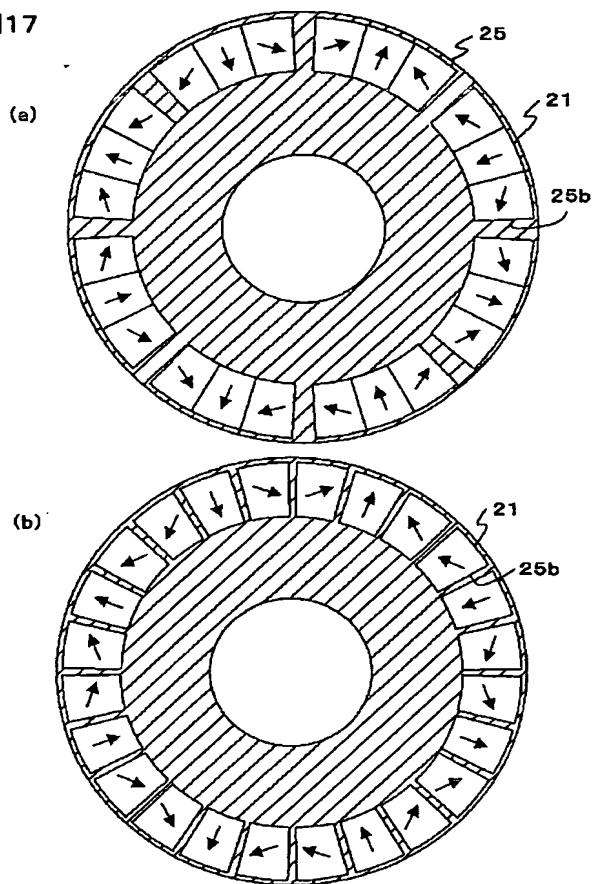
【図16】

図16



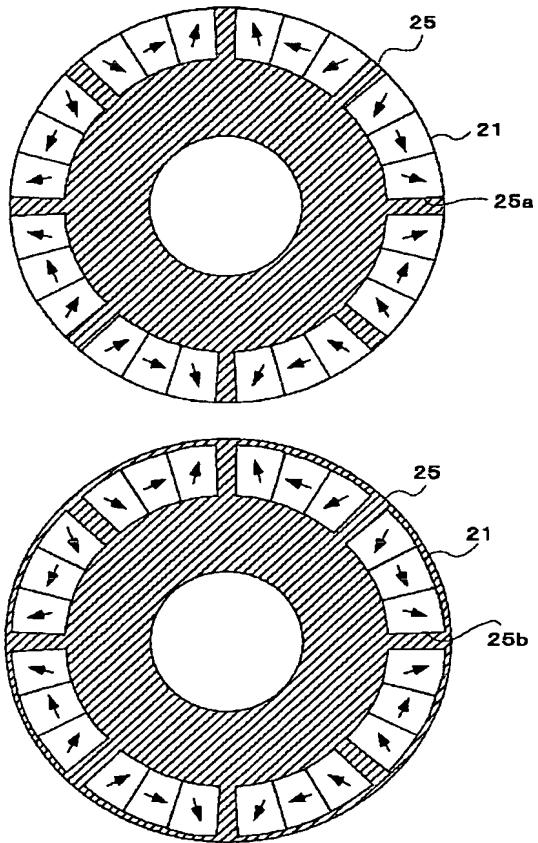
【図17】

図17



【図18】

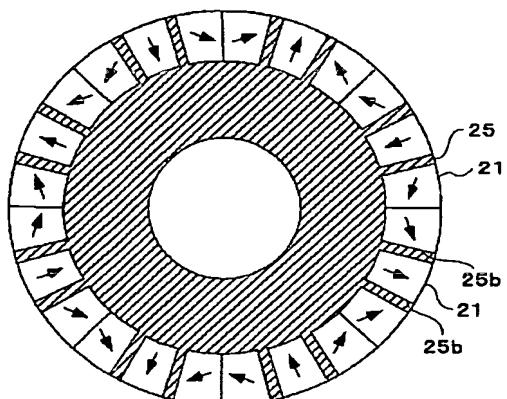
図18



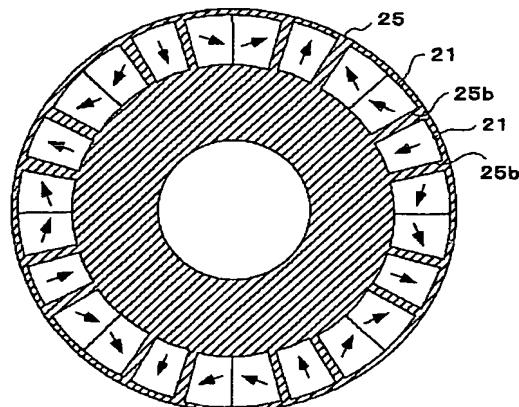
【図19】

図19

(a)



(b)



フロントページの続き

(72)発明者 小室 又洋

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株
式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 留奥 寛

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株
式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 伊藤 元哉

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株

式会社日立製作所日立研究所内

F ターム(参考) 5H621 AA02 BB07 GA04 GA11 HH03

JK02 JK03

5H622 AA02 CA02 CA10 CA14 CB01

DD01 QB01